第46卷 第7期
2023年7月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 7
Jul. 2023

新疆农业碳排放强度时空变化趋势与收敛分析

夏文浩[1]， 王铭扬[1]， 姜 磊[2,3]

（1. 塔里木大学经济与管理学院，新疆 阿拉尔 843300；2. 广州大学地理科学与遥感学院，广东 广州 510006；
3. 广州大学华南人文地理与城市发展研究中心，广东 广州 510006）

摘 要：选择农用物资、水稻种植、畜牧养殖与秸秆燃烧4个方面对新疆农业碳排放进行综合测算，揭示新疆农业碳排放总量与强度的时空差异及动态变化，然后采用空间收敛分析方法，进一步考察了新疆13个地州市农业碳排放强度的收敛趋势。结果表明：(1) 2007—2019年新疆农业碳排放总量处于平稳上升态势，但农业碳排放强度持续降低。(2) 2019年农业碳排放总量位居首位的是伊犁哈萨克自治州直属县市（伊犁州直），吐鲁番市最末。新疆13个地州市仅有伊犁州直与和田地区农业碳排放总量处于下降态势，其余地区均处于增长态势。总体上，新疆各地州市农业碳排放强度呈现出了“北低南高”的特征。(3) 新疆各地州市农业碳排放强度的动态演进特征差异较大，核密度曲线随着时间的推移整体呈现小幅度左移趋势；农业碳排放强度的集中程度不断增强。(4) 新疆各地州市的农业碳排放强度表现出显著的β收敛特征，进一步说明地州市间农业碳排放强度的差距在不断缩小。并且，还发现条件β收敛速度明显高于绝对β收敛，进一步地纳入空间因素后会加快收敛速度。研究结果对推动新疆低碳农业发展与实现“双碳”目标具有重要现实意义。

关 键 词：农业碳排放；时空变化；核密度分析；空间收敛模型；新疆

文章编号：1000-6060(2023)07-1145-10(1145~1154)

2005年中国超越美国成为世界第一大CO_2排放国。2021年，中国碳排放量占全球总排放量的30.99%，占整个亚洲地区总排放量的60.26%[1]。作为负责任的大国，习近平总书记2020年在联合国大会上庄严宣布中国的“双碳”目标，即力争2030年实现“碳达峰”，2060年之前实现“碳中和”。工业是中国碳排放最大的部门，但是中国在农业现代化加速进程中，化肥农药的过量投入、农业机械的推广应用以及牛、羊禽畜养殖规模的不断增加，使得农业碳排放占中国碳排放总量的16%~17%[2]，已经成为了不可忽视的重要碳排放部门。因此，在“双碳”目标下，农业碳排放成为亟待重视的现实问题[3]。新疆是中国重要的种植业、畜牧业和草原基地，西部大开发与对口援疆战略的实施，加速了新疆农业经济的发展。但相对落后的资源集约型生产方式以及缓慢的绿色生产转型速度，依然加剧新疆的农业碳排放当量[4]。因此，深入研究新疆地区农业碳排放的增长趋势以及区域差异，甄别出新疆地区影响农业碳排放的独特驱动因素，为助力新疆农业“碳达峰碳中和”提供参考。

目前，学术界对农业碳排放的测算、时空分布、动态演进和空间收敛等方面进行了大量研究。其中，关于农业碳排放核算体系应用的研究，国内外学者已有较多成果，大致分为以下3种：一是从农业生产投入视角出发，选取化肥、农药、农膜、农用柴油、翻耕和农业灌溉6类碳源对中国农业碳排放进行测算[5]；二是从农业各个生产部门出发，对农业能源消耗[6]、土地利用类型[7]等单个维度的农业碳排

收稿日期：2022-09-13； **修订日期：**2022-11-15
基金项目：广东省自然科学基金团队项目(2018B030312004)；兵团社会科学基金项目(22YB22)；塔里木大学研究生科研创新项目(TDGRI202264)；国家级大学生创新创业训练计划(202210757054)资助
作者简介：夏文浩(1998-)，男，硕士研究生，主要从事农业低碳发展研究. E-mail: xiawenhao199883@163.com
通讯作者：姜磊(1983-)，男，博士，副教授，主要从事经济地理研究. E-mail: jianglei@gzhu.edu.cn

放量进行测度;三是从农业多个生产部门出发,对农业能源消耗、农用物资消耗、稻田种植、禽畜养殖与秸秆燃烧5类碳源造成的农业碳排放进行综合测算[3]。关于碳排放的测算方法,目前较为主流的有生命周期评价法、模型法和排放因子法等。例如,Rathna等[8]使用生命周期评估法估算柬埔寨传统食品生产系统的CO_2排放量。Zhang等[9]借助生命周期评价法,从生产投入、农场管理、生长期、加工和销售以及消费5个阶段测算了中国湖北省水稻生产和消费的碳足迹。李波等[10]、田云等[11]使用排放因子法对中国省际农业碳排放进行测度,研究发现中国农业碳排放总量呈现上升趋势。在计算出农业碳排放量后,学者们还关注了农业碳排放的时空特征[12],总体而言,中国整体农业碳排放的空间差异明显,呈现以发达地区、粮食主产区和畜牧优势区为集中的空间分布趋势。此外,亦有学者利用核密度估计[5]和收敛模型[13]等方法对农业碳排放的动态演进特征进行了研究,均发现中国区域间农业碳排放强度差异呈现不断缩小的态势。例如,Li等[14]研究发现中国30个省份的农业温室气体排放量存在明显的绝对β收敛。Cui等[15]研究发现中国及四大区域的农业碳排放强度均存在显著的绝对β收敛与条件β收敛。

综上所述,目前学术界有关农业碳排放的研究成果较为丰硕,但仍有以下2个方面未受到学者们的关注:一是现有成果绝大多数关注内陆地区农业发展水平较高的地区,鲜少涉及新疆地州市尺度的农业碳排放研究;二是鲜有学者对新疆农业碳排放的区域差异、动态演进和地州市间收敛趋势进行分析。新疆人均耕地面积与单位面积粮食产量均位居全国前列,是中国种养殖大省之一,由此导致的农业碳排放总量同样位居中国所有省份的前列。因此,本文从农用物资投入、水稻种植、禽畜养殖与秸秆燃烧4个方面对新疆农业碳排放进行测算,然后从时空维度揭示新疆农业碳排放的发展趋势与动态演进,最后构建收敛模型,考察新疆地州市间农业碳排放强度的空间收敛趋势,以期为实现区域农业低碳转型提供科学的决策依据。

1 研究区概况

新疆(73°30′~96°23′E,34°25′~48°10′N)位于中国西北边陲,总面积166.49×10^4 km^2,既是中国占地面积最大的省级行政区,也是中国种植养殖业大省之一。在种植业方面:2020年,新疆年末耕地面积为524.23×10^4 hm^2,人均耕地面积为0.2 hm^2·人$^{-1}$;新疆粮食种植面积237.17×10^4 hm^2,粮食产量同比(较2019年)增产9.6%;2019年新疆农用化肥施用量、农药使用量、农用塑料薄膜使用量分别达到257.80×10^4 t、2.29×10^4 t、26.27×10^4 t。在畜牧业方面:新疆2020年牛、羊、猪禽肉产量157.66×10^4 t,牛、羊、猪存栏数量达到5075.15×10^{4}头。

2 数据与方法

2.1 农业碳排放量核算

本研究农业碳排放主要包含4个方面:一是农用物资投入。其碳源主要有:化肥、农药、农膜运输过程中所产生的生命周期隐含碳、农业机械作业耗费的柴油所产生的碳排放、土地翻耕所产生的碳排放、农业灌溉过程中用电所产生的碳排放,排放系数见表1。二是水稻种植碳排放。水田生态系统中,水稻根部厌氧呼吸较强,且水田土壤对CH_4的吸

表1 主要碳源与碳排放系数

Tab. 1 Major carbon sources and carbon emission coefficients

碳源	指标	碳排系数	参考来源
化肥	化肥折纯施用量	0.8956 kg C·kg^{-1}	美国橡树岭国家实验室(OPNL)
农药	农药使用量	4.9341 kg C·kg^{-1}	美国橡树岭国家实验室(OPNL)
农膜	农膜使用量	5.18 kg C·kg^{-1}	南京农业大学农业资源与生态环境研究所(IREEA)
柴油	农用柴油使用量	0.8864 kg C·kg^{-1}	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)[16]
翻耕	农作物播种面积	312.60 kg C·hm^{-2}	中国农业大学农学与生物技术学院(IABCAU)
灌溉	有效灌溉面积	266.48 kg C·hm^{-2}	段华平等[17]
水稻	西北单季稻种植面积	231.2 kg C·hm^{-2}	省级温室气体清单编制指南
秸秆	秸秆焚烧量	1247 kg C·t^{-1}	杨乐等[18]

收作用较弱，所以水田生态系统的CH_4排放量较多[19]，体现为水稻种植过程中稻田的CH_4排放，排放系数见表1。三是畜牧业碳排放。禽畜养殖所产生的碳排放主要来自养殖过程中牲畜肠道蠕动发酵与粪便管理造成的CH_4和N_2O排放[20]。文章依据新疆畜牧养殖区域特色，将牛、马、驴、猪、羊等大牲畜纳入核算指标体系，其碳排放系数来源于《省级温室气体清单编制指南》。四是秸秆焚烧碳排放。新疆秸秆资源十分丰富，2017年秸秆产生量为3346.19×10^4 t。农作物秸秆燃烧将会释放大量的碳，秸秆焚烧碳排放的估算公式如下[18]：

$$C_{秸秆燃烧}=S\times R\times W \quad (1)$$

式中：$C_{秸秆燃烧}$为秸秆焚烧碳排放的总量（10^4 t）；S为秸秆产生总量（10^4 t）；R为秸秆焚烧系数，参考杨乐等[18]的研究成果，秸秆焚烧系数为秸秆作为燃料直接燃烧和露天焚烧之和占秸秆产生总量的比重（30%），故本文将秸秆焚烧系数设置为0.3；W为碳转换系数。

本文采用草谷比法对秸秆产生量进行计算，主要碳转换系数与农作物草谷比系数借鉴毕于运等[21]的研究成果。此外，根据IPCC（联合国政府间气候变化专门委员会）第四次评估报告给出的全球变暖潜势值，1 t CH_4所引发的温室效应相当于25 t CO_2所引发的温室效应，约合6.82 t碳，1 t N_2O所引发的温室效应约合81.27 t，并以此为依据进行转换。

综上，构建新疆农业碳排放量测算公式：

$$E=\sum_{i=1}^{j}E_i=\sum_{i=1}^{j}T_i\times V_i \quad (2)$$

式中：E为农业碳排放总量（10^4 t）；E_i为碳源i的碳排放量（10^4 t）；T_i为碳源i的活动水平（10^4 t）；V_i为碳源i的碳排系数；j为碳源的数量。

2.2 核密度估计

核密度估计是一种采用连续密度曲线绘制随机变量分布形态及特征，本文将使用此方法进一步分析新疆农业碳排放强度的动态演进[22]。假设农业碳排放强度（EI）的密度函数为：

$$f(\mathrm{EI})=\frac{1}{Nh}\sum_{i=1}^{N}K\left(\frac{\mathrm{EI}_i-\overline{\mathrm{EI}}}{h}\right) \quad (3)$$

式中：$f(\mathrm{EI})$为核密度估计函数；N为样本数量，N=13；h为带宽；K为核函数；EI_i为新疆地州市i的农业碳排放强度（10^{-4} t·元$^{-1}$）；$\overline{\mathrm{EI}}$为新疆13个地州市农业碳排放强度均值（10^{-4} t·元$^{-1}$）。

2.3 收敛检验模型

2.3.1 经典β收敛 β收敛是从增长率的视角考察新疆各地州市农业碳排放强度的变化趋势[23]。如果农业碳排放强度较高地区降低的速率高于碳排放强度低的地区，进而收敛于同一稳态，则说明存在绝对β收敛。若在此基础之上考虑到区域异质性或其他控制变量的初始条件，则为条件β收敛。

经典绝对β收敛模型的计算公式为：

$$\ln\left(\frac{\mathrm{EI}_{i,t+1}}{\mathrm{EI}_{i,t}}\right)=\alpha+\beta\ln\mathrm{EI}_{i,t}+\varepsilon_{it} \quad (4)$$

经典条件β收敛模型的计算公式为：

$$\ln\left(\frac{\mathrm{EI}_{i,t+1}}{\mathrm{EI}_{i,t}}\right)=\alpha+\beta\ln\mathrm{EI}_{i,t}+\sum_{k=1}^{k}\theta_k Z_{k,i,t}+\mu_i+\eta_t+\varepsilon_{i,t} \quad (5)$$

式中：$\mathrm{EI}_{i,t}$为第i个地州市在第t年的农业碳排放强度（10^{-4} t·元$^{-1}$）；$\ln\left(\frac{\mathrm{EI}_{i,t+1}}{\mathrm{EI}_{i,t}}\right)$为地州市$i$在时间$t$到$t$+1农业碳排放强度增长率；$\mu_i$、$\eta_t$分别为个体效应和时间效应；$Z_{k,i,t}$为一系列的外生控制变量；$\alpha$为常数项；$\varepsilon_{i,t}$为随机误差项；$\theta_k$为控制变量的待估计系数；$\beta$为待估计的收敛系数，当$\beta$系数显著为负时，表示各地州市农业碳排放强度存在收敛趋势。

2.3.2 空间β收敛 经典β收敛是在各地区之间相互独立的假设基础上建立的。然而，任何事物之间都是相互关联的，且距离较近的事物比距离较远的事物关联度更大[24]。因此，仅考虑本区域内农业碳排放强度而忽视其空间溢出效应，将会导致研究结果出现偏差，故文章借鉴王钰凯等[25]的做法将空间因素纳入传统的经典β收敛模型，更好地检验农业碳排放强度的空间收敛性，计算公式如下：

$$\begin{cases}\ln\left(\frac{\mathrm{EI}_{i,t+1}}{\mathrm{EI}_{i,t}}\right)=\alpha+\beta\ln\mathrm{EI}_{i,t}+\rho\sum_{k=1}^{n}\theta_k Z_{k,i,t}+\\ \varphi\sum_{i=1}^{n}w_{ij}\ln\mathrm{EI}_{i,t}+\sum_{i=1,k=1}^{n}\theta_k Z_{k,i,t}+\sum_{i=1}^{k=1}w_{ij}\gamma_k Z_{k,i,t}\\ +\mu_i+\eta_t+\varepsilon_{i,t}\\ \varepsilon_{i,t}=\tau\sum_{n=1}^{n}w_{ij}\varepsilon_{i,t}+v_{i,t}\end{cases} \quad (6)$$

式中：τ、φ、γ_k、ρ为待估计的空间滞后项系数；当$\tau=0$且$\varphi=\gamma_k=0$时，式（6）为空间滞后模型；当$\tau=0$时，式（6）为空间杜宾模型；当$\rho=0$且$\varphi=\gamma_k=0$时，

式(6)为空间误差模型；w_{ij} 为空间权重矩阵中的元素。本文采用的是地理空间权重矩阵，公式如下：

$$w_{ij}^{d}=\begin{cases}\dfrac{1}{d_{ij}^{2}}, & i\neq j\\ 0, & i=j\end{cases} \tag{7}$$

式中：d_{ij} 为基于高德地图计算的新疆地州市 i 和地州市 j 之间的公路距离(km)。本文采用基于公路距离而非球面直线距离构造的地理距离空间权重矩阵，主要是因为新疆地区各地州市间距离较远，反映在地图上的"虚拟"空间距离很难具备经济属性，现实中各地州市之间的经济联系在很大程度上是通过公路运输而实现的。

2.4 数据来源与变量选取

化肥折纯施用量、农作物播种面积、西北单季稻种植面积、主要农作物产量、农用柴油使用量及新疆主要牲畜年末存栏数据来源于《新疆统计年鉴》(2008—2020年)，农药使用量、农膜使用量、有效灌溉面积数据来源于各地州市统计年鉴，少量缺失值采用各地州市每年的统计公报数值填充以及采用均值替代法与线性插值法进行补全。

考虑到农业碳排放强度的条件收敛需要考虑到地区特征、自然资源禀赋和经济发展状况等多种因素的影响以及避免遗漏变量偏误问题，结合现有文献[3,11]，选取如下控制变量：农业发展水平、农业集聚水平、农业产业结构、农业机械化水平、种植结构、城镇化率、农业固定资产投资、农村居民人均可支配收入、水土流失治理面积和灾害发生面积。为了剔除价格因素的影响，本文对农业发展水平和农业固定资产投资2个变量以2007年为基期进行指数平减处理。

3 结果与分析

3.1 新疆农业碳排放总量及强度的时序特征

从整体看来，2007—2019年新疆农业碳排放总量的演变特征大致分为"快速上升-持续下降-平稳上升"3个不同阶段(图1)。

2007—2015年为第一阶段。8 a来新疆农业碳排放总量持续增长，其中从2008年开始增速加快，往后的6 a增速也是逐步上升，2015年相比2007年农业碳排放总量增加了1112.51×10⁴ t，增幅达53.88%。主要原因是新疆地区抓住西部大开发的

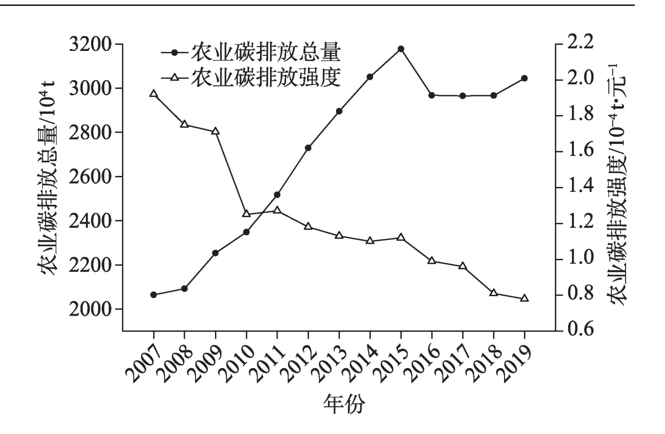


图1 2007—2019年新疆农业碳排放总量和强度发展趋势

Fig. 1 Change trends of total agricultural carbon emissions and intensity in Xinjiang from 2007 to 2019

宝贵机会，再加上2006年取消农业税这一利好政策，大大激发了农户们的生产热情[26]；此外，随着新疆各地州市农业人口不断增加，农业种植技术、农业机械技术的发展，导致农民对耕地的需求不断增加，再加上政府鼓励农民开发戈壁、河滩等不易利用的土地类型发展农业，农业播种面积和耕地面积随之迅速增长，为了提高农业产量，对化肥、农药的需求不断增加[27]。

2015—2017年为第二阶段。新疆农业碳排放总量在此期间不断下降，2017年相比2015年下降了211.88×10⁴ t，降幅为6.67%。究其原因，主要是2015年国家开始实施的"到2020年化肥施用量零增长行动"和"到2020年农药使用量零增长行动"，有效治理农业生产中化肥农药滥用的问题[28]，自此新疆农业碳排放总量开始呈下降趋势。

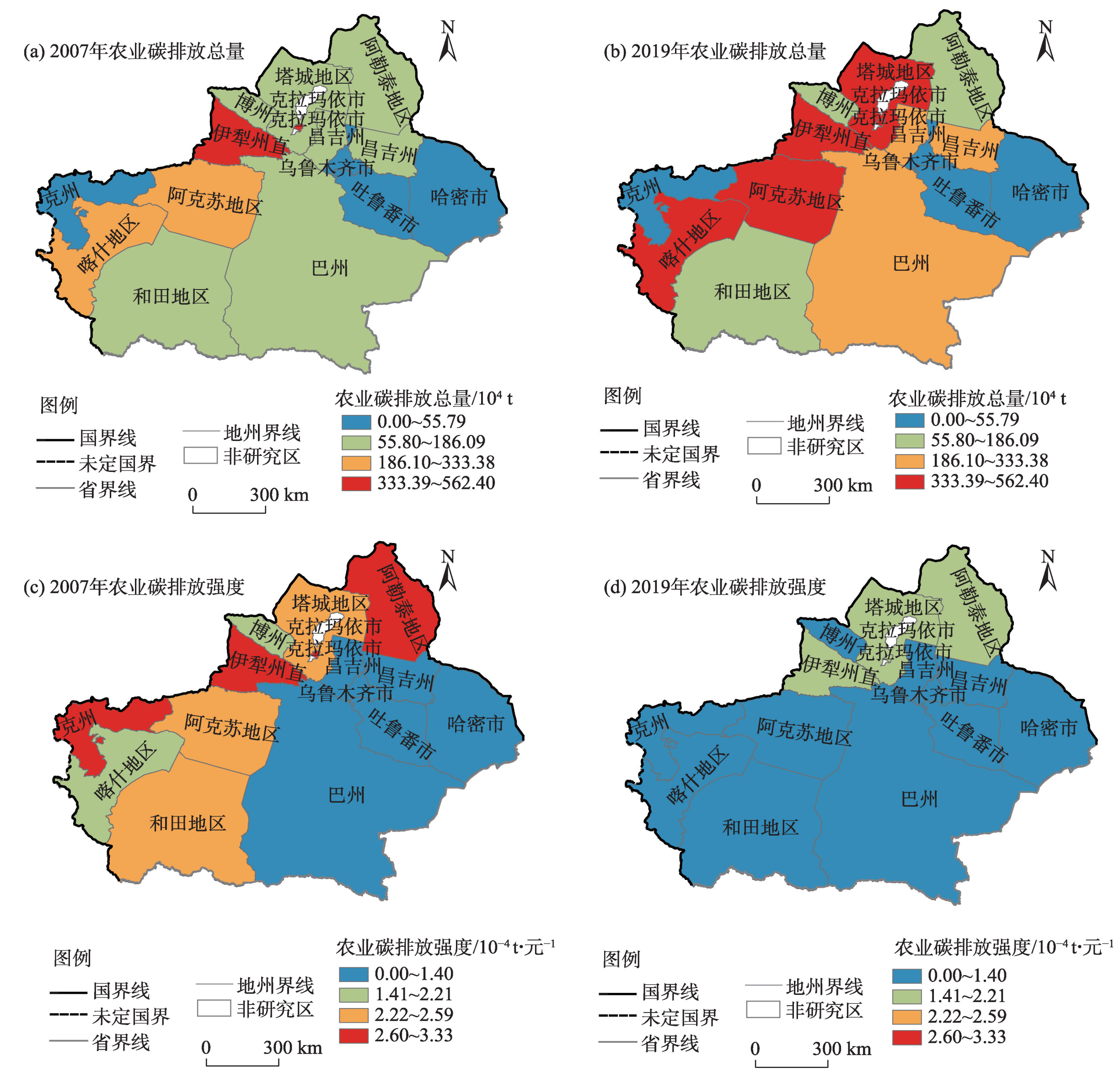
2017—2019年为第三阶段。新疆农业碳排放总量由2965.39×10⁴ t增加到3044.40×10⁴ t，净增加了79.01×10⁴ t，增幅为2.66%。可以看出，新疆农业碳排放的总量虽然继续增加，但增幅很小，也逐步趋于平稳，秸秆燃烧和禽畜养殖依旧是新疆农业碳排放的主要来源，但农业科技的进步、农业生产效率的提高和国家碳减排政策的推动也是其趋于平稳的主要原因。

另一方面，虽然新疆农业碳排放总量不断上升，但是碳排放强度却表现出了明显的下降趋势，2019年新疆农业碳排放强度为0.78×10⁻⁴ t·元⁻¹，较2007年下降了59.38%。这是因为近些年脱贫攻坚战的全面胜利、乡村振兴战略的逐步落地，再加上农业科技的引擎动力，使得农业经济的增长速度远

远高于农业碳排放总量。从统计数据来看，新疆农林牧渔业总产值从2007年的1063.5×10⁸元增长至2021年的5143.12×10⁸元，是2007年的4.84倍；新疆农业碳排放总量从2007年的2064.76×10⁴ t增长至2019年的3044.30×10⁴ t，较2007年提高了47.44%。

3.2 新疆农业碳排放总量及强度的空间差异

从新疆地州市农业碳排放总量及强度的空间分布来看（图2），2007—2019年克孜勒苏柯尔克孜自治州（克州）、乌鲁木齐市、吐鲁番市和哈密市4个地州市的农业碳排放量一直维持在较低水平，均在55.79×10⁴ t以下；伊犁州直的农业碳排放量一直保持在较高水平，均在333.39×10⁴ t以上。相比于基期，2019年巴音郭勒蒙古自治州（巴州）和昌吉回族自治州（昌吉州）的农业碳排放量增长趋势明显，总量由区间（55.80×10⁴~186.09×10⁴ t）跨越至区间（186.10×10⁴~333.38×10⁴ t）；阿克苏地区、喀什地区和塔城地区3个地州市的农业碳排放总量跨越至高排放区间（333.39×10⁴~562.40×10⁴ t），其中喀什地区在2013年的农业碳排放就已经超过了562.40×10⁴ t。其可能的原因是，随着人口的增加以及城市化水平



注：基于自然资源部地图技术审查中心标准地图服务网的审图号为GS(2019)1822号的标准地图绘制，底图边界无修改。昌吉州、伊犁州直、博州、巴州和克州分别为昌吉回族自治州、伊犁哈萨克自治州直属县市、博尔塔拉蒙古自治州、巴音郭楞蒙古自治州、克孜勒苏柯尔克孜自治州的简称。

图2　2007—2019年新疆各地州农业碳排放及强度空间分布

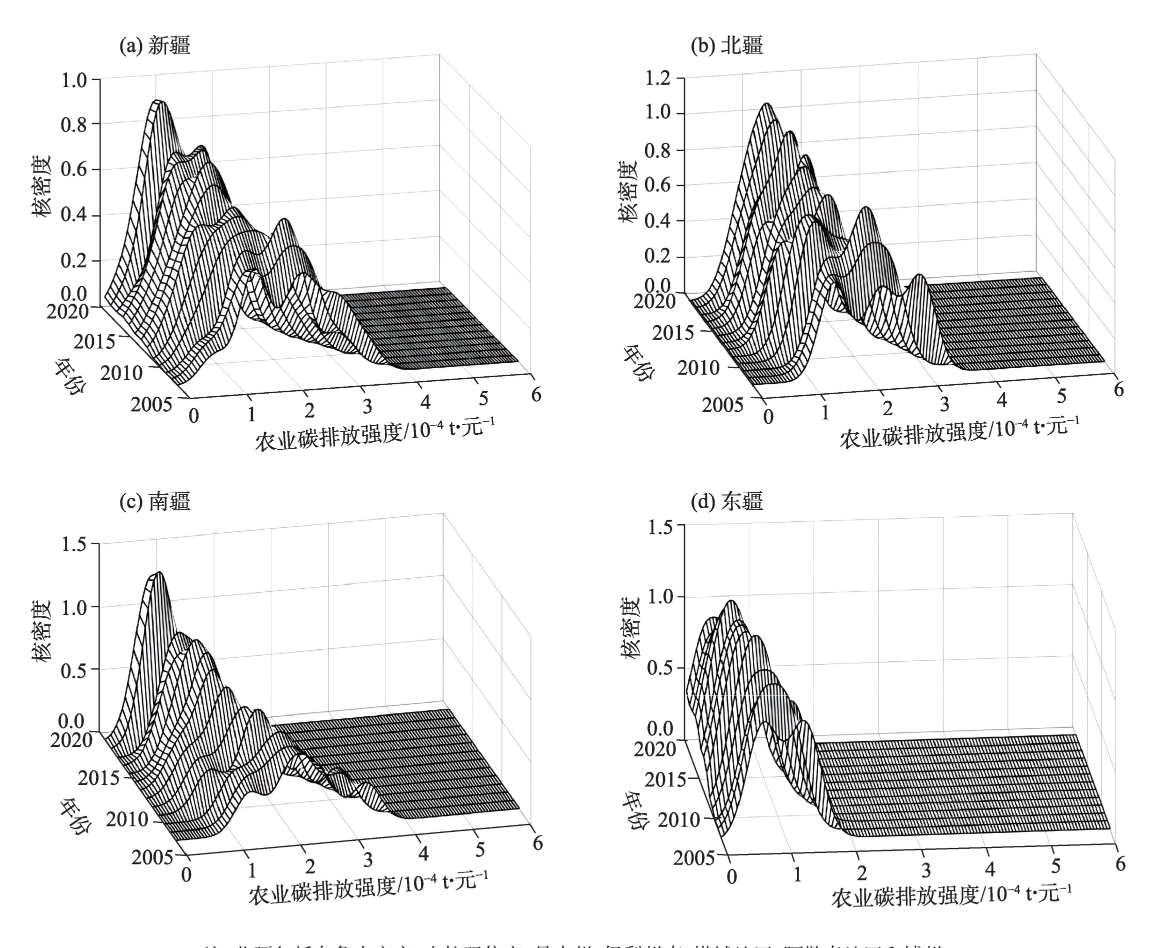
Fig. 2　Spatial distributions of agricultural carbon emissions and intensity in Xinjiang from 2007 to 2019

的提高,人们对于农产品有了更高的需求与要求,且国家对于农作物生产农机的补贴力度进一步加大,局部地区机械化水平不断提升,化肥、柴油等要素投入增多,导致局部地区农业碳排放量增加[29]。

从新疆各地州市农业碳排放强度的空间分布来看,考察期内多个地州市农业碳排放强度明显降低,在2007年由克州、伊犁州直、阿勒泰地区3个地州市组成的农业碳排放高强度区间(2.60×10^{-4}~3.33×10^{-4} t·元$^{-1}$),2019年全部降低至农业碳排放中低强度区间(1.41×10^{-4}~2.21×10^{-4} t·元$^{-1}$)以下。与2007年相比,2019年喀什地区、和田地区、阿克苏地区和博尔塔拉蒙古自治州(博州)4个地州市农业碳排放强度进一步下降至低强度区间,其可能原因是:在此期间新疆发展绿色、低碳农业技术,大力推动农业资源养护,加快发展节水农业,调整优化品种结构,从而使新疆农业碳排放强度进一步降低。

3.3 新疆农业碳排放强度的动态演进特征

图3整体上描绘了新疆农业碳排放强度在考察期内的演变情况。综合来看,波峰自右向左偏移,2019年峰值明显高于2007年,并由"一主一次"的两峰形式逐渐演变为单峰形式,变化区间有所扩大。首先,与2007年相比,2013年的曲线形态由"一主一次"的两峰形式变为单峰形式,密度函数中心向左移动且峰值较高,变化区间扩大。由此表明,该阶段新疆农业碳排放强度有所下降且新疆13个地州市的差距增大。其次,与2013年相比,2019年的密度函数中心继续向左移动,曲线形态保持单峰形式,变化区间明显扩大。由此表明,该阶段新疆农业碳排放强度继续下降,新疆13个地州市的差距继续增大。最后,与2007年相比,2019年的密度函数中心大幅度的向左转移,主峰峰值明显增大,变化的区间也有所扩大,逐步变为单峰的形式。总的来说,2007—2019年新疆农业碳排放强度明显降低,



注:北疆包括乌鲁木齐市、克拉玛依市、昌吉州、伊犁州直、塔城地区、阿勒泰地区和博州;东疆包括吐鲁番市和哈密市;南疆包括巴州、阿克苏地区、克州、喀什地区与和田地区。

图3 新疆各地州市农业碳排放强度的核密度分析

Fig. 3 Kenrel density analysis of agricultural carbon emission intensity in Xinjiang

但新疆各地州市的差距却逐步扩大。可能的原因是,新疆各地州市的不同农业生产与发展模式之间存在着差异,进而影响了新疆各地州市农业现代化的步伐与产业结构的调整,从而客观上加剧了新疆各地区农业碳排放强度的差异。

3.4 新疆农业碳排放强度的β收敛检验

表2展示了经典β收敛模型与空间β收敛模型的估计结果。由模型(1)的结果可知,系数显著为负(−0.033),即存在绝对β收敛,这说明新疆各个地区的农业碳排放强度最终会收敛于同一个稳态。再纳入了截面固定效应和空间变量后,模型(5)的结果显示存在条件β收敛,而且系数(−0.252)的绝对值大于绝对收敛的绝对值,这说明了在考虑不同地区的各自地区特征以及控制变量后,收敛的速度会有所加快。同时,本研究对新疆13个地州市的农业碳排放强度的空间自相关性进行检验,结果表明,2007—2017年新疆农业碳排放强度的Moran's *I*均显著为正,除2018年和2019年以外,均通过了5%的显著水平检验,且统计量介于0.050~0.112之间,说明新疆13个地州市的农业碳排放强度在空间上呈现显著的正相关性,因此,在经典β收敛模型基础之上,本研究又引入了空间β收敛模型。

最优空间计量模型的选取根据以下原则:赤池信息准则(AIC)值越小,对数似然值(Log-Likelihood)越大,模型的拟合程度越高。检验结果发现,空间杜宾模型(SDM)的Log-Likelihood统计值最大,总体上认为SDM模型的估计结果最优,且空间效应系数 ρ 显著大于0,这表示地区间农业碳排放强度的收敛性存在显著的空间溢出效应。接下来以SDM模型的结果作为分析基础。

通过表2可以发现以下3方面的结论:

(1) 新疆各地州市间农业碳排放强度存在显著的收敛趋势。所有 β 收敛模型的 $\ln EI_{i,t}$ 估计系数均为负且均通过1%的显著性检验,这说明无论是否纳入空间因素,新疆农业碳排放强度的发展均存在收敛趋势,体现出地州市间农业碳排放强度的差异在逐渐缩小,也就是说农业碳排放强度值较低的地州市对较高值地州市存在显著的"追赶效应"。

(2) 条件 β 收敛的速度明显快于绝对 β 收敛。分别对比模型(1)与模型(5),模型(2)、模型(3)、模型(4)与模型(6)、模型(7)、模型(8)可以发现,新疆农业碳排放强度绝对 β 收敛速度均小于条件 β 收敛速度。这是因为条件 β 收敛性考虑到地州市间不同农业经济发展水平等方面的差异性,进

表2　绝对与条件β收敛分析结果

Tab. 2　Analysis results of absolute and conditional β convergence

变量	绝对β收敛				经典条件β收敛	条件β收敛		
	经典绝对β收敛	空间绝对β收敛				空间条件β收敛		
		SEM	SAR	SDM		SEM	SAR	SDM
	模型(1)	模型(2)	模型(3)	模型(4)	模型(5)	模型(6)	模型(7)	模型(8)
$\ln EI_{i,t}$	−0.033**(−2.34)	−0.175***(−5.35)	−0.129***(−4.93)	−0.209***(−4.69)	−0.252**(−3.91)	−0.308***(−5.42)	−0.333***(−5.73)	−0.332***(−5.41)
$W\times\ln EI_{i,t}$	–	–	–	0.116**(2.21)	–	–	–	−0.072(−0.65)
控制变量	No	No	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
σ^2	–	0.012***(8.63)	0.012***(8.70)	0.012***(8.64)	–	0.011***(8.57)	0.011***(8.64)	0.010***(8.63)
γ/ρ	–	0.351***(4.24)	0.299***(3.65)	0.347***(4.23)	–	0.379***(4.39)	0.350***(4.34)	0.338***(3.94)
Constant	−0.050***(−5.34)	–	–	–	0.384**(2.38)	–	–	–
AIC		−237.74	−234.21	−236.98		−232.43	−232.83	−224.49
Log-L		121.87	120.11	122.49		129.22	129.42	136.25
Obs.	156	156	156	156	156	156	156	156
R^2	0.023	0.220	0.235	0.195	0.257	0.151	0.104	0.008

注:经典收敛括号内为*t*值,空间收敛括号内为*z*值;***、**、*分别表示通过1%、5%和10%的显著性检验;囿于篇幅,上述结果中省略了SDM模型中控制变量与空间权重矩阵交互项的系数与*z*值;SEM为空间误差模型;SAR为空间滞后模型;SDM为空间杜宾模型;$\ln EI_{i,t}$为农业碳排放强度的对数值,为收敛模型中的核心解释变量;$W\times\ln EI_{i,t}$为农业碳排放强度与空间权重矩阵的交互项;控制变量有农业发展水平、农业集聚水平和农业产业结构等变量;σ^2 为个体效应的特异误差,值越小代表回归拟合得越好;γ 和 ρ 为空间效应系数;Constant为常数项;AIC为赤池信息准则;Log-L为Log-Likelihood的简写,为对数似然值;Obs.为样本量;R^2为决定系数。

而加快了收敛速度缩短了收敛的时间。

(3) 空间交互影响会进一步提高收敛速度。考虑空间效应的空间条件 β 收敛速度(0.332)相比经典条件 β 收敛速度(0.209)高,这说明空间交互因素具有加速收敛的效果,由此可见,空间溢出效应在收敛检验时是不可忽视的重要因素。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 新疆农业碳排放总量处于平稳上升态势但碳排放强度持续降低。2019年新疆农业碳排放总量相比于2007年增加了47.44%,其演变过程大致分为快速上升、持续下降和平稳上升3个阶段。2019年农业碳排放强度相比于2007年下降了59.38%。

(2) 新疆农业碳排放总量与强度的地州市差异明显。2019年新疆农业碳排放总量位居首位的是伊犁州直,吐鲁番市最末。农业碳排放强度总体呈现出了"北低南高"的特征,其中塔城地区的强度最高,吐鲁番市最末。

(3) 从动态演进看,新疆各地州市农业碳排放强度均存在下降趋势但地州市间的差异有所扩大;各地州市间的动态演进特征存在较大的差异,北疆与南疆表现出"多峰"到"单峰"转移的趋势,极化现象有所缓和。新疆整体农业碳排放强度表现出显著的β收敛特征,进一步说明地州市间农业碳排放强度的差距在不断缩小;条件β收敛速度明显高于绝对β收敛,并且纳入空间因素后会进一步提高收敛速度。新疆地州市间农业碳排放存在显著的空间依赖性。

4.2 建议

(1) 新疆农业碳排放总量与强度的地州市差异明显,这就需要各地州市应结合发展阶段特征,因地制宜制定精细化碳减排政策。例如,伊犁州直、塔城地区、阿克苏地区与喀什地区农业碳排放总量较高,鉴于当地种养殖特征,该类地州市应着力于应用绿色农业生产技术与农业废弃物资源化利用,加大政府科普部门的宣传力度,通过农民技术培训等方式大力宣传农业废弃物资源化利用的好处与二次收益。

(2) 新疆农业碳排放总量与强度的地州市差异逐渐扩大,这需要加强各地的互动合作,缩小地州市间农业碳排放的差异。各地州市应定时开展座谈交流会,积极分享当地碳减排典型经验与特色做法,大力激发碳减排效果显著地区的示范带动作用,加快高碳排放地区向低排放地区收敛;同时,示范地区应警惕区域间的负向溢出效应而产生的危机转嫁。

(3) 由新疆地州市间农业碳排放存在显著的空间依赖性可知,各地应注重加强地州市间和地州市内的合作发展,发挥好各地州市自身的农业资源优势,加快形成协同高效的低碳发展格局。尤其是新疆农业碳排放强度存在显著的空间条件β收敛,更需要各地区发挥优势,充分协调到农业集聚、农业机械化水平和种植结构等要素配置,共同发力治理农业碳排放问题,推动碳减排政策有效且可持续执行。

参考文献(References)

[1] BP. BP Statistical Review of World Energy 2022[R/OL]. [2022-11-20]. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate-/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf.

[2] 赵文晋, 李都峰, 王宪恩. 低碳农业的发展思路[J]. 环境保护, 2010(12): 38-39. [Zhao Wenjin, Li Dufeng, Wang Xian'en. Development ideas of low-carbon agriculture[J]. Environmental Protection, 2010(12): 38-39.]

[3] 田云, 尹忞昊. 中国农业碳排放再测算: 基本现状、动态演进及空间溢出效应[J]. 中国农村经济, 2022(3): 104-127. [Tian Yun, Yin Minhao. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: Basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects[J]. Chinese Rural Economy, 2022(3): 104-127.]

[4] 冉锦成, 马惠兰, 苏洋. 西北五省农业碳排放测算及碳减排潜力研究[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(3): 623-632. [Ran Jincheng, Ma Huilan, Su Yang. A study on agricultural carbon emission and carbon emission reduction potential in five provinces in northwest China[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017, 39(3): 623-632.]

[5] 刘华军, 鲍振, 杨骞. 中国农业碳排放的地区差距及其分布动态演进——基于Dagum基尼系数分解与非参数估计方法的实证研究[J]. 农业技术经济, 2013(3): 72-81. [Liu Huajun, Bao Zhen, Yang Qian. The regional gap of China's agricultural carbon emissions and its distribution dynamic evolution: An empirical study based on Dagum Gini coefficient decomposition and nonparametric estimation method[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2013(3): 72-81.]

[6] 张恒硕, 李绍萍, 彭民. 中国农村能源消费碳排放区域非均衡性及驱动因素动态识别[J]. 中国农村经济, 2022(1): 112-134.

[Zhang Hengshuo, Li Shaoping, Peng Min. Regional imbalance of carbon emissions from China's rural energy consumption and dynamic identification of driving factors[J]. Chinese Rural Economy, 2022(1): 112-134.]

[7] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961. [Zhou Jia, Wang Yuxuan, Liu Xuerong, et al. Spatial temporal differences of carbon emissions and carbon compensation in China based on land use change[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(12): 1955-1961.]

[8] Rathna H, Phanna L, Putra A S, et al. Estimation of carbon dioxide emissions from a traditional nutrient-rich Cambodian diet food production system using life cycle assessment[J]. Sustainability, 2021, 13(7): 3660, doi: 10.3390/su13073660.

[9] Zhang L, Ruiz-Menjivar J, Tong Q, et al. Examining the carbon footprint of rice production and consumption in Hubei, China: A life cycle assessment and uncertainty analysis approach[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 300: 113698, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113698.

[10] 李波, 张俊飚, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80-86. [Li Bo, Zhang Junbiao, Li Haipeng. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(8): 80-86.]

[11] 田云, 张俊飚, 尹朝静, 等. 中国农业碳排放分布动态与趋势演进——基于31个省(市、区)2002—2011年的面板数据分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(7): 91-98. [Tian Yun, Zhang Junbiao, Yin Zhaojing, et al. Distributional dynamics and trend evolution of China's agricultural carbon emissions: An analysis on panel data of 31 provinces from 2002 to 2011[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(7): 91-98.]

[12] 龙志, 孙颖琦, 郎丽霞, 等. 黄土高原典型县域碳排放特征与时空格局——以庆城县为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1631-1641. [Long Zhi, Sun Yingqi, Lang Lixia, et al. Spatiotemporal patterns and characteristics of carbon emissions in the Loess Plateau: A case study of Qingcheng County[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1631-1641.]

[13] 高鸣, 宋洪远. 中国农业碳排放绩效的空间收敛与分异——基于Malmquist-luenberger指数与空间计量的实证分析[J]. 经济地理, 2015, 35(4): 142-148, 185. [Gao Ming, Song Hongyuan. Dynamic changes and spatial agglomeration analysis of the Chinese agricultural carbon emissions performance[J]. Economic Geography, 2015, 35(4): 142-148, 185.]

[14] Li N, Li Y M, Mu H L, et al. Convergence of China's agricultural greenhouse gases[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2020, 18(1): 609-624.

[15] Cui Y, Khan S U, Deng Y, et al. Spatiotemporal heterogeneity, convergence and its impact factors: Perspective of carbon emission intensity and carbon emission per capita considering carbon sink effect[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 92: 106699, doi: 10.1016/j.eiar.2021.106699.

[16] IPCC. Climate change 2007: Mitigation of climate change. Contribution of working group Ⅲ to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 63-67.

[17] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203-208. [Duan Huaping, Zhang Yue, Zhao Jianbo, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 203-208.]

[18] 杨乐, 邓辉, 李国学, 等. 新疆绿洲区秸秆燃烧污染物释放量及固碳减排潜力[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 988-993. [Yang Le, Deng Hui, Li Guoxue, et al. Pollutant releases from crop residue burning and carbon emission mitigation potential by biochar in Xinjiang oasis[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(5): 988-993.]

[19] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 21-27. [Min Jisheng, Hu Hao. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7): 21-27.]

[20] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 247-252. [Hu Xiangdong, Wang Jimin. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10): 247-252.]

[21] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211-217. [Bi Yuyun, Gao Chunyu, Wang Yajing, et al. Estimation of straw resources in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 211-217.]

[22] 杨骞, 司祥慧, 王珏. 减排增汇目标下中国粮食生产效率的测度及分布动态演进[J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 600-615. [Yang Qian, Si Xianghui, Wang Jue. The measurement and its distribution dynamic evolution of grain production efficiency in China under the goal of reducing pollution emissions and increasing carbon sink[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 600-615.]

[23] 姜磊, 柏玲. 中国能源强度的空间分布与收敛研究——基于动态空间面板模型的分析[J]. 西部论坛, 2014, 24(4): 61-69. [Jiang Lei, Bo Ling. Study on spatial distribution and convergence of China's energy intensity: Analysis based on dynamic spatial panel model[J]. Western Forum, 2014, 24(4): 61-69.]

[24] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography, 1970, 46: 234, doi: 10.2307/143141.

[25] 王钰凯, 郭辉. 新疆旅游业生态效率时空分异与收敛性研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1320-1331. [Wang Yukai, Guo Hui. Spatial and temporal differentiation and convergence studies of the eco-efficiency of Xinjiang tourism industry[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1320-1331.]

[26] 桂河, 李静, 尚梦媛. "双碳"背景下的宁夏农业碳排放时序特

征、驱动机理与脱钩效应研究[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2021, 15(6): 37−44. [Gui He, Li Jing, Shang Mengyuan. Study on temporal characteristics, driving mechanism and decoupling effect of agricultural carbon emission in Ningxia under the background of "double carbon"[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences Edition), 2021, 15(6): 37−44.]

[27] 夏文浩, 潘生亮, 霍瑜, 等. 新疆农业面源污染的时空分异及动态演进——基于特色畜牧视角的再分析[J]. 资源开发与市场, 2022, 38(10): 1190−1199. [Xia Wenhao, Pan Shengliang, Huo Yu, et al. Spatial-temporal differentiation and dynamic evolution of agricultural non-point source pollution in Xinjiang: Re-analysis based on the perspective of characteristic animal husbandry[J]. Resource Development & Market, 2022, 38(10): 1190−1199.]

[28] 罗斯炫, 何可, 张俊飚. 增产加剧污染? ——基于粮食主产区政策的经验研究[J]. 中国农村经济, 2020(1): 108−131. [Luo Sixuan, He Ke, Zhang Junbiao. The more grain production, the more fertilizers pollution: Empirical evidence from major grain-producing areas in China[J]. Chinese Rural Economy, 2020(1): 108−131.]

[29] 冉锦成, 苏洋, 胡金凤, 等. 新疆农业碳排放时空特征、峰值预测及影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(8): 16−24. [Ran Jincheng, Su Yang, Hu Jinfeng, et al. Temporal and spatial characteristics, peak value forecast and influencing factors of agricultural carbon emissions in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(8): 16−24.]

Spatiotemporal variation trends and convergence analysis of agricultural carbon emission intensity in Xinjiang

XIA Wenhao[1], WANG Mingyang[1], JIANG Lei[2,3]

(1. School of Economics and Management, Tarim University, Aral 843300, Xinjiang, China; 2. School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China; 3. Center for Human Geography and Urban Development, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: The spatiotemporal differences and dynamic changes of total agricultural carbon emissions and intensity in Xinjiang, China, were investigated by analyzing agricultural materials, rice cultivation, livestock breeding, and straw burning. The convergence trends of agricultural carbon emissions intensity in 13 prefectures and cities were examined by performing spatial convergence analysis. The results revealed the following: (1) Although the total agricultural carbon emissions in Xinjiang from 2007 to 2019 increased steadily, the intensity of agricultural carbon emissions exhibited a decreasing trend. (2) In 2019, the total agricultural carbon emission was the highest in counties and cities of Ili Kazak Autonomous Prefecture and lowest in Turpan City. A declining trend of total agricultural carbon emissions was observed only in the counties and cities of Ili Kazak Autonomous Prefecture and Hotan region, whereas the rest of the regions exhibited an increasing trend. Generally, a "low in the north and high in the south" trend was observed in the intensity of agricultural carbon emissions in Xinjiang. (3) The dynamic evolutionary characteristics of agricultural carbon emission intensity varied widely across Xinjiang prefectures and cities. The kernel density curve showed an overall small leftward shift over time. Furthermore, the concentration of agricultural carbon emission intensity was increasing. (4) The agricultural carbon emission intensities of various prefectures and cities in Xinjiang exhibited significant β-convergence characteristics, which indicated that the gap in agricultural carbon emission intensities between prefectures and cities was narrowing. Moreover, the conditional β convergence rate was considerably higher than absolute β convergence, and the further incorporation of the spatial factor increased the convergence rate. The results of the study can be used for the development of low-carbon agriculture in Xinjiang to achieve "dual carbon" goals.

Key words: agricultural carbon emissions; spatiotemporal variations; kernel density analysis; spatial convergence model; Xinjiang